

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ МИКРОСФЕР

В.М. Китайцев<sup>1</sup>, С.Т. Клышников<sup>1</sup>, Б.Г. Кукуй<sup>1</sup>,  
А.И. Пластинин<sup>2</sup>, С.С. Глазырин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «ВНИИМТ» (г. Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup> ООО НПЦ УИЦЭ (г. Екатеринбург, Россия)

*Разработано теплоизоляционное и огнезащитное покрытие серии «ВУЛКАН» на основе полых микросфер для применения в машиностроении, строительстве, энергетике и металлургии. Определены его теплофизические свойства – теплопроводность и температуропроводность. Показана возможность использования этого покрытия в качестве теплоизоляционного и огнезащитного материала.*

**Ключевые слова:** огнезащита, теплоизоляция, теплофизические свойства.

*Thermal insulation and fire retardant coating series «Volcano» based on hollow microspheres for use in engineering, construction, energy and metallurgy was developed. Thermal properties were determined. This coating may be used for insulation and fire-retardant material.*

**Keywords:** fire protection, thermal insulation, thermal properties.

Одним из перспективных направлений инноваций в развитии промышленности является энергосбережение, в том числе разработка эффективных теплоизоляционных материалов, основой которых является регулируемая микропористость. Важным шагом в этом направлении может быть применение полых микросфер со связующими, обеспечивающее хорошие теплоизоляционные свойства и простоту нанесения на сложные конструктивные узлы и поверхности. Теплофизические свойства таких теплоизоляционных материалов изучены недостаточно. Особенно важно для практического применения и прогнозирования теплоизоляционной защиты определение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и влияние на теплопроводность связующего компонента.

ООО НПЦ «Уральский инновационный центр энергосбережения» (Екатеринбург) разработал и выпускает «Покрытие теплоизоляционное и огнезащитное «Вулкан» согласно ТУ 5768-00-16887554–2012 на основе полых микросфер со связующим. Покрытие легко наносится на любую доступную поверхность и обладает хорошей адгезией как на металлических, так и на строительных конструкциях. Высокие теплоизоляционные и огнезащитные свойства покрытия многократно подтверждены результатами его промышленного применения.

Следует отметить, что компоненты покрытия серийно выпускаются в РФ, что обусловило относительную его дешевизну, а также кратчайшие сроки изготовления и поставки.

Для использования покрытия «Вулкан-О» в качестве огнезащиты требовалось определить минимальную толщину покрытия, обеспечивающую защиту наружной стенки изделия от перегрева выше заданной температуры в течение определенного времени, необходимого для принятия противопожарных мероприятий.

В целях минимизации экспериментальных исследований в ОАО «ВНИИМТ» выполнена работа по разработке математической модели нестационарного процесса нагрева изделия цилиндрической формы с изоляционным покрытием и определению теплофизических свойств покрытия «ВУЛКАН» для адаптации математической модели.

Для расчета поля температур в двухслойном полой цилиндре решалась задача нестационарной теплопроводности:

$$\rho(x, r) \cdot C(x, r, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(x, r, T) \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x, r, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;  $x, r$  – продольная координата и радиус;  $\rho(x, r)$  – плотность;  $C(x, r, T)$  – теплоемкость;  $\lambda(x, r, T)$  – теплопроводность.

Наличие теплоизоляционного слоя на поверхности цилиндра учитывалось в зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , плотности  $\rho$  и теплоемкости  $C$  от  $r$ :

$$\lambda(x, r, T) = \begin{cases} \lambda(x, T) \text{ изделия, } r_1 \leq r \leq r_2 \\ \lambda(x, T) \text{ изоляция, } r_2 < r \leq r_2 + h \text{ изол} \end{cases}$$

$$\rho(r) = \begin{cases} \rho \text{ изделия, } r_1 \leq r \leq r_2 \\ \rho \text{ изоляция, } r_2 < r \leq r_2 + h \text{ изол} \end{cases} \quad (2)$$

$$C(x, r, T) = \begin{cases} C(T) \text{ изделия, } r_1 \leq r \leq r_2 \\ C(T) \text{ изоляция, } r_2 < r \leq r_2 + h \text{ изол} \end{cases}$$

Для наружной поверхности покрытия использовали граничные условия 3-го рода для боковой поверхности цилиндра

$$r_2 + h \text{ изол} \quad (3)$$

и для торцовых поверхностей

$$x = x_0$$

$$x = x_1 \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду с температурой.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  с учетом излучения определялся следующим образом:

$$\alpha = \alpha_1 + 5,67 \cdot 10^8 \cdot \varepsilon \cdot \frac{(T_{\text{окр ср}}^4 - T^4)}{(T_{\text{окр ср}} - T)} = \alpha_1 + 5,67 \cdot 10^8 \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{окр ср}}^2 + T^2) \cdot (T_{\text{окр ср}} + T), \quad (5)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\varepsilon$  – степень черноты покрытия.

Для расчета температурного поля на основе уравнения (1) необходимо знание теплофизических свойств огнезащитного покрытия, в частности, теплопроводности  $\lambda$ .

Определение коэффициентов температуропроводности и теплопроводности покрытия «Вулкан-О» проводилось двумя методами: методом регулярного режима 1-го рода Г.М. Кондратьева [1] для низких температур 100 и 200 °С и методом эталона в широком диапазоне температур.

Суть метода регулярного режима основана на том, что при наступлении регулярного режима темп охлаждения  $m = -\frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ , где  $\theta$  – безразмерная

температура тела, не зависит ни от координат, ни от времени и является величиной постоянной для всех точек тела. Темп охлаждения  $m$  зависит только от физических свойств тела, процесса охлаждения на его поверхности, геометрической формы и размеров тела. Для определения коэффициента температуропроводности  $a$  (м<sup>2</sup>/с) использовали  $a$ -калориметр, имеющий форму цилиндра. Создавались условия теплоотдачи на поверхности  $\alpha \rightarrow \infty$ , измерялось изменение избыточной температуры во времени и строилась зависимость избыточной температуры от времени в полулогарифмических координатах.

Темп охлаждения определяли из соотношения:

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (6)$$

Коэффициент температуропроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  находили из соотношений

$$a = K \cdot m, \lambda = a \cdot \rho \cdot C, \quad (7)$$

здесь  $K$  – коэффициент пропорциональности, который зависит только от геометрической формы и размеров тела.

Основные результаты экспериментов по определению коэффициентов температуропроводности и теплопроводности насыпного слоя микросфер из силиката бора, являющихся основным компонентом покрытия «Вулкан-О», в различных средах, а также материала «Вулкан-О» приведены в табл. 1. Как видно из представленных результатов, теплопроводность слоя микросфер практически не зависит от среды (воздух и вакуум), наличие плотного связующего компонента приводит к увеличению коэффициента теплопроводности в 2 раза.

Метод регулярного режима с охлаждением в водяном термостате позволяет определять коэффициент температуропроводности и теплопроводности при невысоких температурах до 300 °С.

Для получения значений коэффициента теплопроводности в более широком диапазоне температур был применен метод эталона. В качестве эталона использовали цилиндрический сердечник из материала с известными теплофизическими свойствами (в данном случае медь), с высокой теплопроводностью и теплоемкостью, на внешнюю поверхность которого наносился

Таблица 1

Результаты определения темпа охлаждения  $m$ , коэффициента температуропроводности  $a$ , плотности  $\rho$ , теплопроводности  $\lambda$  насыпного слоя микросфер из силиката бора и огнезащитного покрытия «Вулкан-О» методом регулярного режима первого рода

№ п.п.	Материал	Начальная температура образца, °С	Темп охлаждения, $m$	$a$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ ,* Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К
1	Слой микросфер из силиката бора, среда – воздух	200	0,004	$1,89 \cdot 10^{-7}$	204	800	0,031
2	Слой микросфер из силиката бора, среда – вакуум	200	0,004	$1,89 \cdot 10^{-7}$	—/—	—/—	0,031
3	Слой микросфер из силиката бора, среда – вакуум	300	0,004	$1,89 \cdot 10^{-7}$	—/—	—/—	0,031
4	Вулкан-О	100	0,005	$2,19 \cdot 10^{-7}$	353	800	0,062
5	Вулкан-О	200	0,005	$2,19 \cdot 10^{-7}$	—/—	—/—	0,062

\* Оценочное значение по данным для основных составляющих компонент.

слой исследуемого материала. Образец помещали в электропечь и нагревали с постоянной скоростью. При нагреве измеряли температуру в центре сердечника и на внешней поверхности исследуемого материала. Постоянная скорость нагрева регулировалась по температуре на внешней поверхности исследуемого материала.

Зависимость теплопроводности исследуемого материала от температуры находилась методом приближений при численном решении задачи теплопроводности (1)–(5) и нахождении массива коэффициентов теплопроводности при разных температурах, обеспечивающего минимальное среднеквадратичное отклонение расчетных температур на внешней и внутренней сторонах материала от экспериментально измеренных. Тепловой поток через слой исследуемого материала при этом рассчитывался по экспериментальным данным изменения во времени температуры сердечника с известными теплофизическими свойствами – теплоемкостью и плотностью:

$$Q(\tau) = M_s \cdot C_s \cdot \frac{dT_s}{d\tau}, \quad (8)$$

где  $Q$  – поток тепла через слой исследуемого материала, Вт;  $M_s$  – масса эталона, кг;  $C_s$  – теплоемкость эталона, Дж/(кг·°С);  $T_s$  – температура эталона, °С;  $\tau$  – время, с.

Значения коэффициентов теплопроводности материалов, исследованных методом эталона, приведены на рис. 1.

Данные, полученные методом эталона, удовлетворительно коррелируют с таковыми, полученными методом регулярного режима Кондратьева 1-го рода (табл. 2).

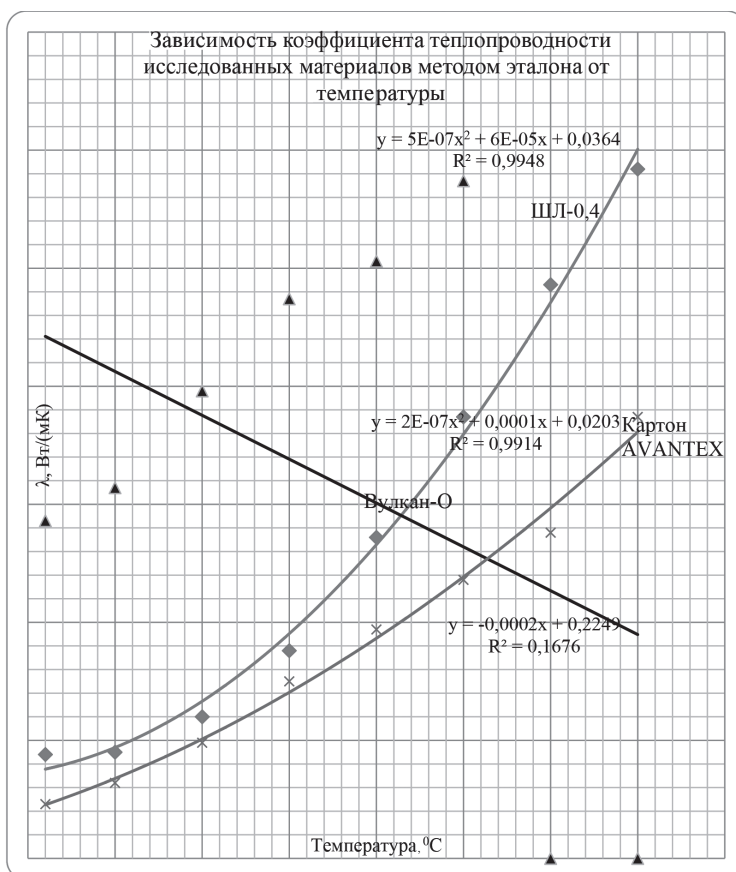


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности материалов, исследованных методом эталона, от температуры

На основании полученных экспериментальных данных по теплофизическим свойствам материала «Вулкан-О» проведена адаптация математической модели (1)–(5) нагрева изделия с теплозащитным покрытием. Адаптация состояла в сравнении расчетных и экспериментальных данных изменения температуры внутренней поверхности изделия во времени при внешнем температурном воздействии. Образцы – труба из сплава АМГ6  $d = 35 \times 3$  мм и длиной 157–200 мм с двумя типами защитного покрытия – картон AVANTEX и «Вулкан-О».

Таблица 2

Сравнение коэффициентов теплопроводности, полученных методом эталона и методом регулярного режима 1-го рода

Температура, °C	$\lambda$ , Вт/м·К (метод регулярного режима 1-го рода)	$\lambda$ , Вт/м·К (метод эталона)
100	0,062	0,045
200	0,062	0,060

Образец помещался в предварительно нагретый муфель из кварцевого стекла. В процессе эксперимента измерялись наружная температура покрытия и температура внутренней стенки металлического образца. Условия внешнего теплообмена к поверхности защитного покрытия образца моделировались параметрами конвективного и лучистого теплообмена таким образом, чтобы расчетная температура внешней поверхности защитного покрытия максимально совпадала с экспериментальными значениями.

Результаты сравнения расчетных температур с экспериментальными значениями приведены на рис. 2. Видно, что выбор значений коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и эффективной степени черноты  $\epsilon$  не позволяет с достаточной точностью смоделировать изменение температуры на наружной поверхности. Это может быть связано с возможным изменением эффективной степени черноты от температуры. Тем не менее, видно удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных значений изменения температуры внутренней поверхности образца во времени.

Образец – труба из АМГ6, теплоизолятор картон AVANTECH.

Расчет: Температура нагревателя = 900 °С,  $\alpha = 10$  Вт/м·К, эффективный коэффициент черноты  $\epsilon_{\text{эфф}} = 0,04$ .

Таким образом, можно использовать математическую модель для оценочных расчетов нагрева образцов с разной толщиной защитного покрытия.

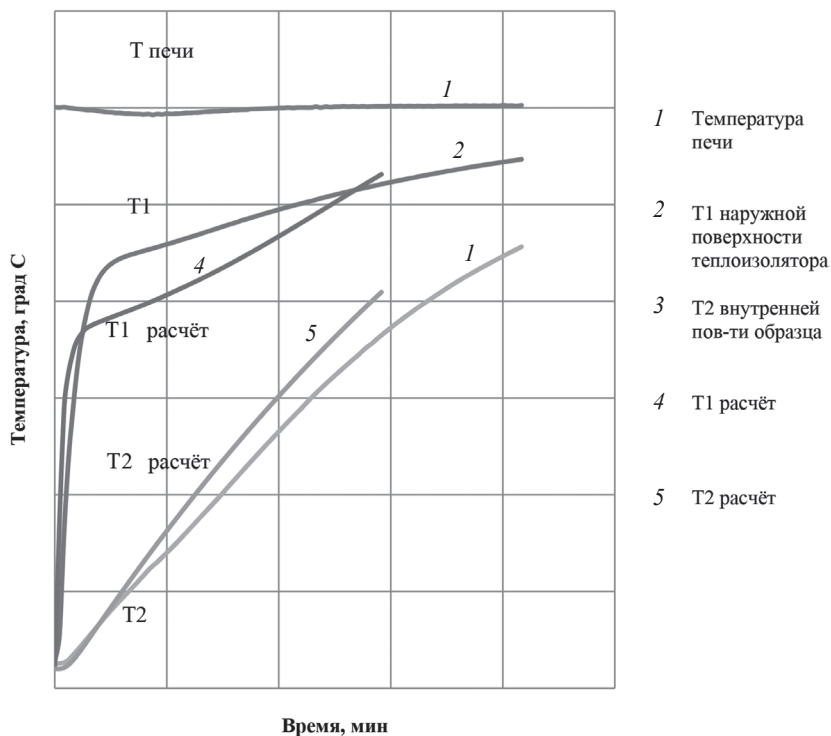


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре наружной и внутренней поверхности образца

Для проверки достоверности результатов модели проведено сравнение экспериментальных данных, полученных при нагреве образца с защитным покрытием толщиной 2,5 мм в открытом пламени и расчетных данных. Результаты сравнения приведены на рис. 3. Видно удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

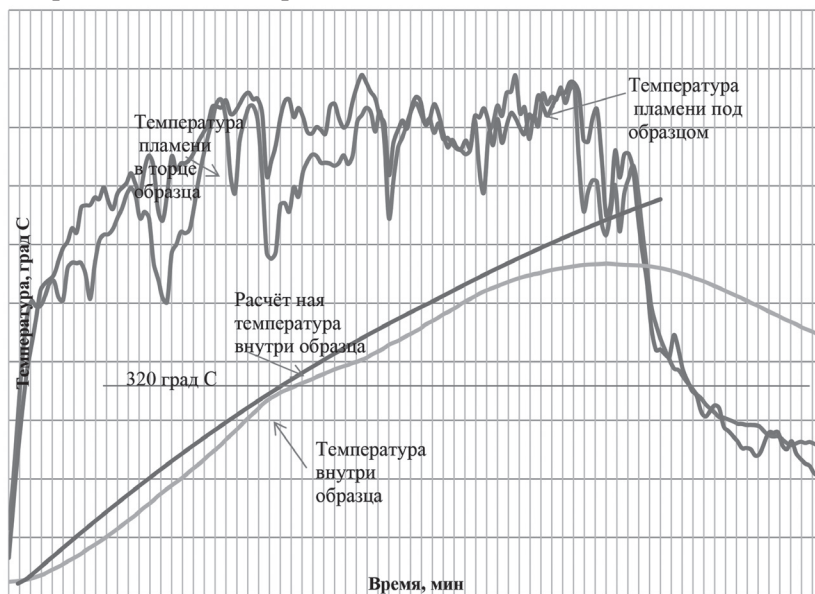


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре внутренней поверхности образца. Образец – труба из АМГ6, защитное покрытие «Вулкан-О»

## Выводы

1. Определены коэффициенты теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционного и огнезащитного покрытия «Вулкан-О». Коэффициент теплопроводности покрытия зависит от температуры по параболическому закону и имеет значения от 0,044 Вт/(м·К) при температуре 20 °С до 0,292 Вт/(м·К) при температуре 700 °С.
2. Показана возможность применения покрытия как огнезащитного, в открытом пламени при температуре пламени до 900 °С (позднее установлена возможность применения в открытом пламени при температуре 1300 °С).
3. Разработана и адаптирована математическая модель изменения во времени температуры внутренней и внешней поверхности изделия цилиндрической формы с огнезащитным покрытием, учитывающая различные условия внешнего теплообмена.

## Список использованных источников

1. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
2. Электрические печи сопротивления и дуговые печи / Под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
3. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1960. – 392 с.